

# Die Rolle thermischer Energiespeicher im Energiesystem der Zukunft

Antje Wörner

5. Energiekolloquium der Chemie-Gesellschaften  
Frankfurt, 27. März 2014



Wissen für Morgen



# Gliederung

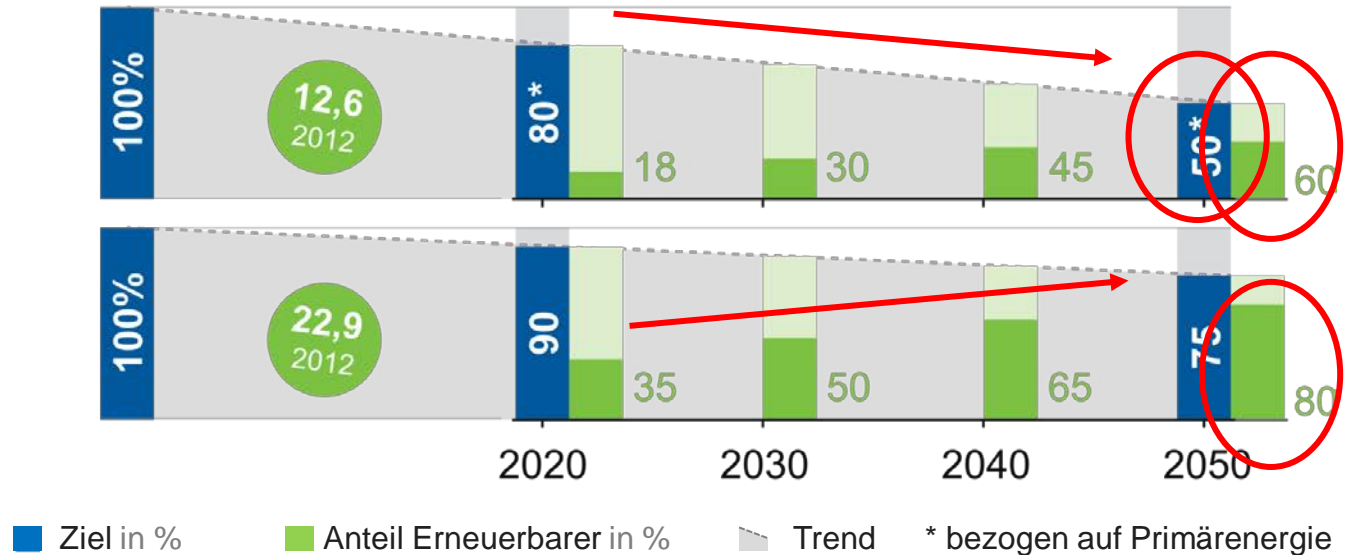
- Mögliche Beiträge thermischer Energiespeicher im zukünftigen Energiesystem
- Beispiele zur Effizienzsteigerung in der Industrie
- Beispiele zur Flexibilisierung und Netzstabilität
- Beispiele für die Integration erneuerbarer Energien
- Fazit



# Die Ziele des Energiekonzepts der Bundesregierung

Endenergieverbrauch  
(gegenüber 2008)

Stromverbrauch  
(gegenüber 2008)



Quelle: Craig Morris, Martin Pehnt (2012)

**Effizienzsteigerung und Erhöhung des Anteils Erneuerbarer Energien** sind wesentliche Bausteine zur Erreichung der Ziele

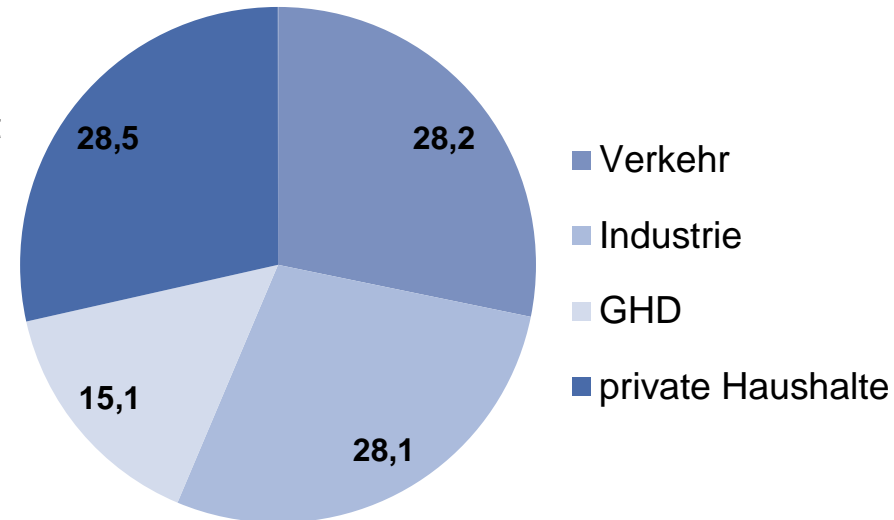
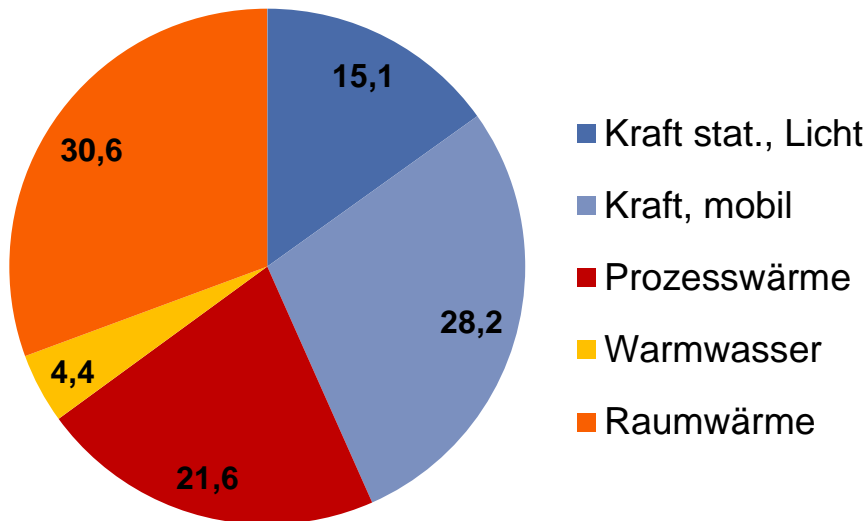


# Der Endenergieverbrauch in Deutschland 2008

## nach Nutzungsarten

## nach Verbrauchssektoren

Endenergie 2010 – 9.060 PJ/a (2.516 TWh/a)



Auswertungstabellen der AGEb, Stand: Juli 2011; BDEW-Endenergieverbrauchsstruktur, 2008

Quelle: BMU Leitstudie 2011

- Knapp **57 % des Endenergieverbrauchs** wird zur Bereitstellung von Wärme genutzt



# Thermische Energiespeicher als Querschnittstechnologie

1. **Steigerung der Effizienz** industrieller Prozesse durch die Nutzung von Abwärmeströmen
2. Schaffung zusätzlicher **Flexibilitätsoptionen** für konventionelle Kraftwerke und Verknüpfung von regenerativer Stromerzeugung mit Wärmeanwendungen (Power-to-Heat)
3. Erhöhung des Anteils **erneuerbarer Energien** mittels solarthermischer Technologien





# Anforderungsprofil für thermische Energiespeicher

## Speicherprinzip

Sensible  
Wärme

## Anforderungen

- Temperaturniveau

## Anwendungen



**Es gibt nicht die eine Speicherlösung für alle Anforderungen!**

Lade-/Entlade-  
Charakteristik

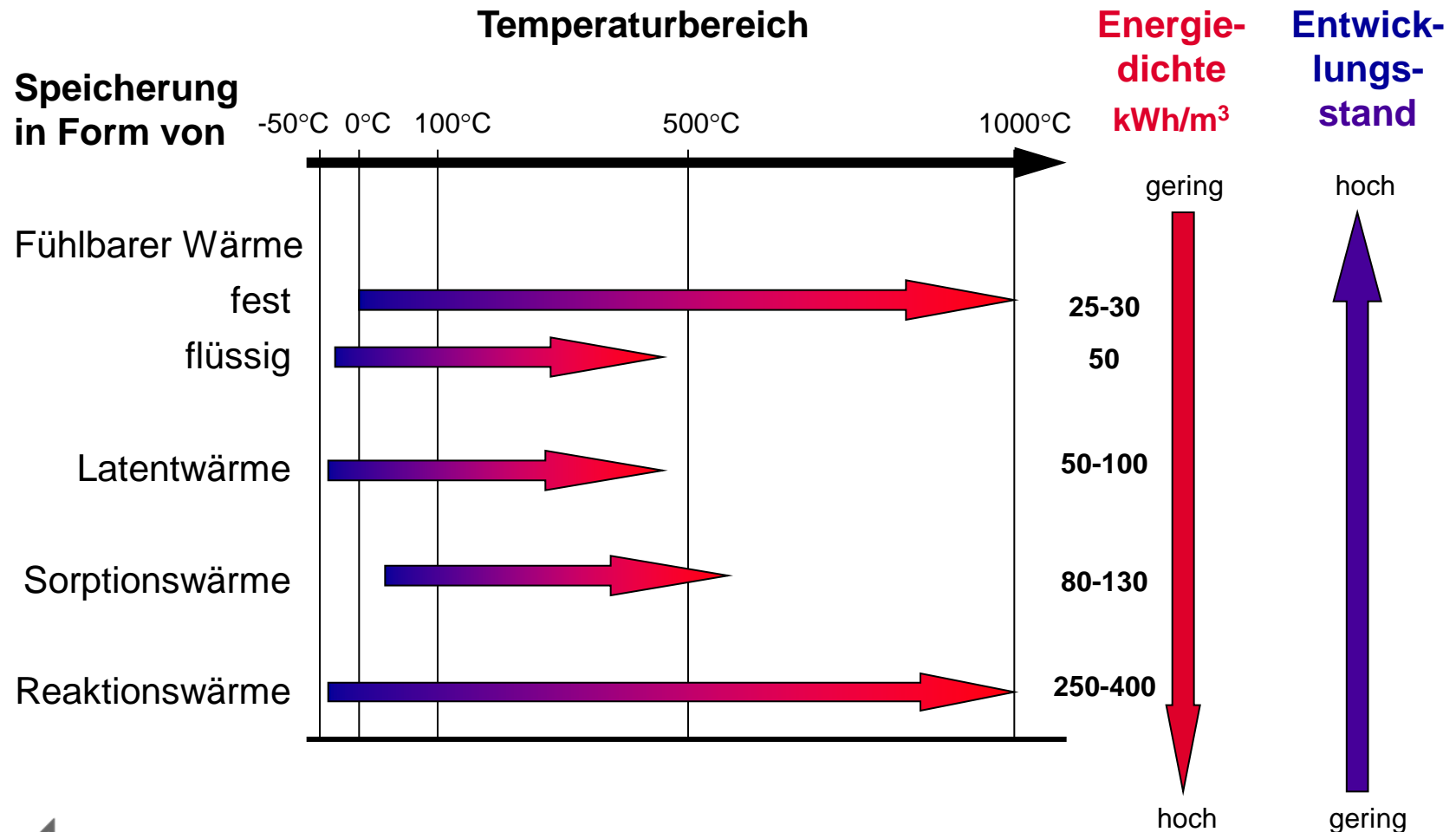
- Speicherkapazität



Reaktions-  
Wärme



# Technologien zur thermischen Speicherung



# Thermische Energiespeicher als Querschnittstechnologie

1. **Steigerung der Effizienz** industrieller Prozesse durch die Nutzung von Abwärmeströmen
2. Schaffung zusätzlicher **Flexibilitätsoptionen** für konventionelle Kraftwerke und Verknüpfung von regenerativer Stromerzeugung mit Wärmeanwendungen (Power-to-Heat)
3. Erhöhung des Anteils **erneuerbarer Energien** mittels solarthermischer Technologien

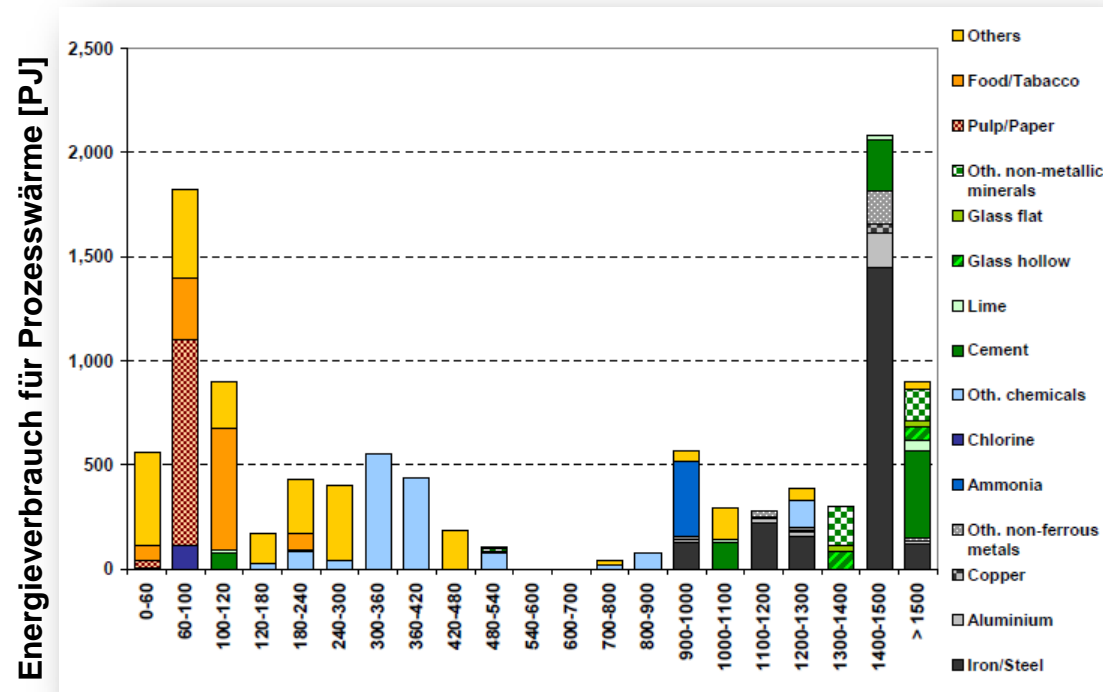




# Abwärmenutzung in industriellen Prozessen

## Wärmemengen nach Temperaturniveau

- Zahlreiche potenzielle Industrieprozesse
- Großes Temperaturspektrum



Quelle: Technology orientated analysis of the emission reduction potentials in the industrial sector in the EU-27 Ralf Kuder, 23.06.2010, Stockholm



# Welche industriellen Prozesse eignen sich?

Ein **Speichereinsatz** ist **sinnvoll** wenn:

- die energetische Prozessintegration ausgeschöpft ist
- eine hinreichend große Abwärmemenge vorliegt
- ein lokaler Energiebedarf besteht
- Angebot und Nachfrage zeitlich nicht zusammenfallen

Szenarien der BMU Leitstudie 2011:

- **Senkung des industriellen Wärmebedarfs** um **27 %** bis im Jahr 2050



# Etablierte Technologien

## Regeneratorspeicher / **Cowper-Speicher**

- Gasförmige Arbeitsmedien
- Hohe Temperaturen
- Stahlindustrie (Heißwind für Hochofen)

## **Ruths-Speicher** (Gefällespeicher)

- Dampf als Arbeitsmedium
- Moderate Drücke
- Dampfbereitstellung in der Baustoffindustrie, Zellstoff- und Papierindustrie, Lebensmittelindustrie, etc.



# Abwärme-Nutzung in der Behälterglas-Industrie

Anbindung an Fernwärmenetz in Neuburg/D.



- 2-10 MW Abwärme aus Schmelzwannen bei 300 bis 800 °C
- Regenerative Wärmerückgewinnung bereits umgesetzt
- 3.000 kW Abwärme nach Abgasreinigung bei 380 °C
- Abhitzekeessel: 2.660 kW, Sattdampf 18,5 bar
- **Wärmespeicher** mit 235 m<sup>3</sup> für 16.400 kWh
- Heizhaus mit 15.000 kW zur Absicherung
- Fernwärmenetz 3.100 Meter
- CO<sub>2</sub>-Einsparung: 6.250 Tonnen/Jahr

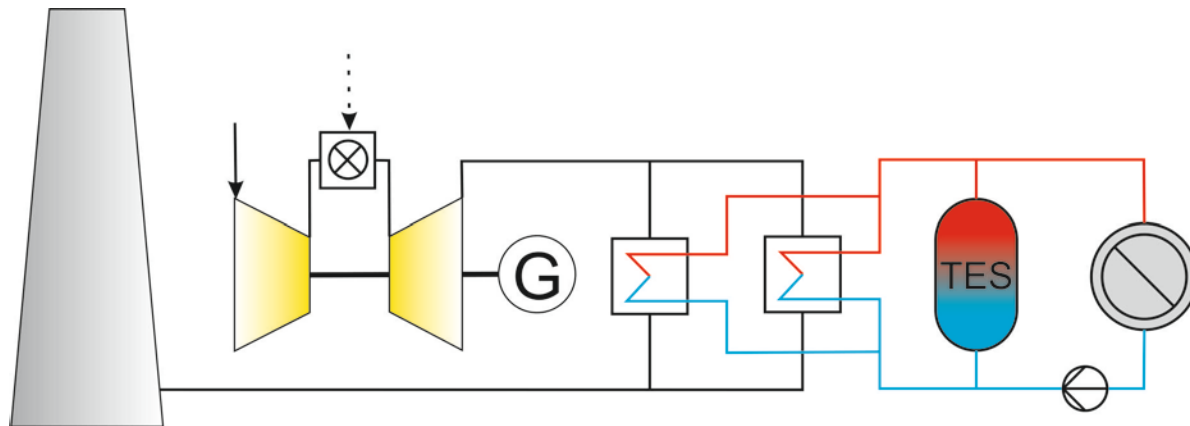




# Dampfbesicherung im Heizkraftwerk

## in Kooperation mit STEAG New Energies GmbH

- Insgesamt 63 Anlagen ( $1.963 \text{ GWh}_{\text{th}}$ ,  $960 \text{ GWh}_e$ )
- In vielen Anlagen sind mögliche Maßnahmen bereits umgesetzt oder nicht sinnvoll
- Speichereinsatz sinnvoll bei Heizkraftwerk mit angeschlossenem Dampfnetz
- Kostengünstige Vorhaltung von Leistungsreserven
- Temperaturniveau  $300^\circ\text{C}$ , 6 MW, 15 MWh

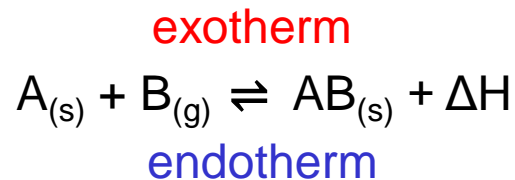




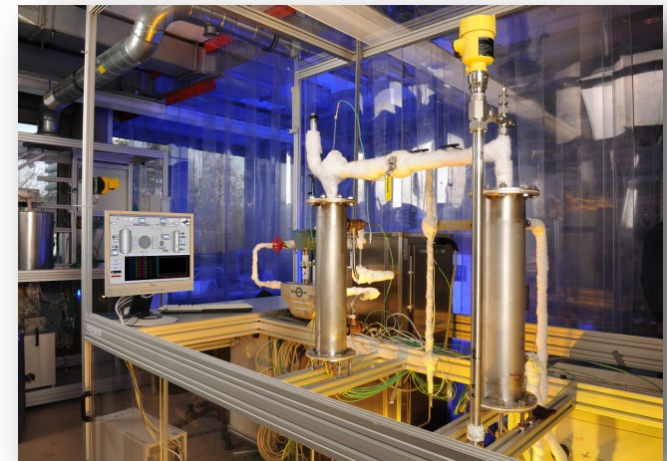
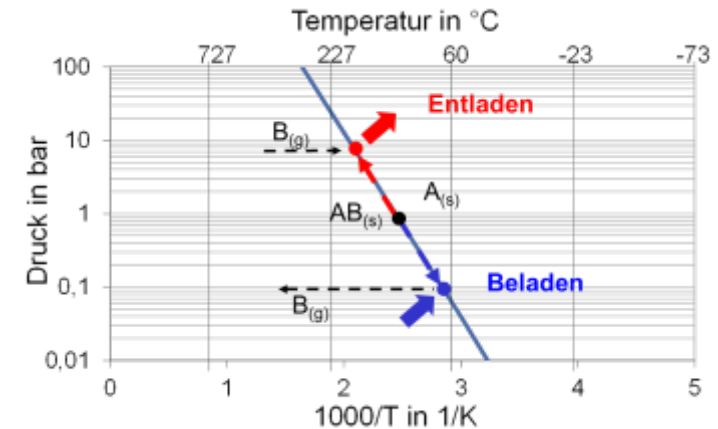
# Thermische Aufwertung von Wärme

## Wärmetransformation mit thermochemischen Systemen

- Gas-Feststoff-Reaktionen



- Nutzung von Druck- oder Konzentrationsdifferenzen, z.B. Abdampf/feuchte Luft
- Nachweis im Labormaßstab erbracht
- 50 K Temperaturhub realisiert
- Passende Reaktionssysteme für Anwendungen auf unterschiedlichen Temperaturniveaus



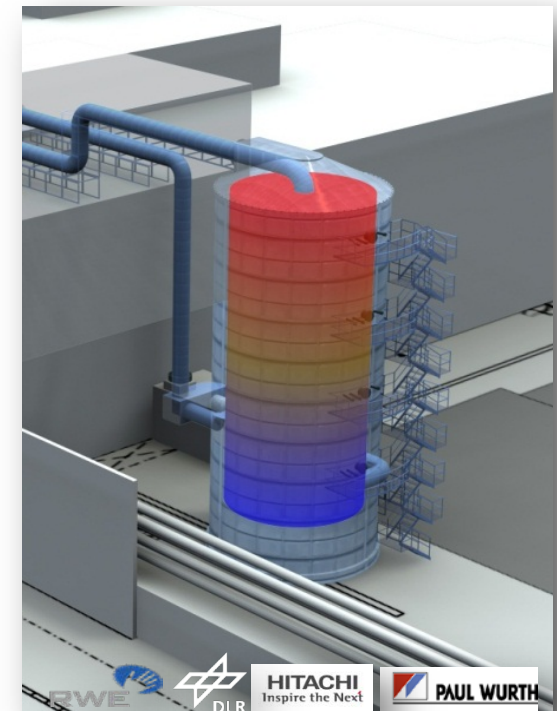
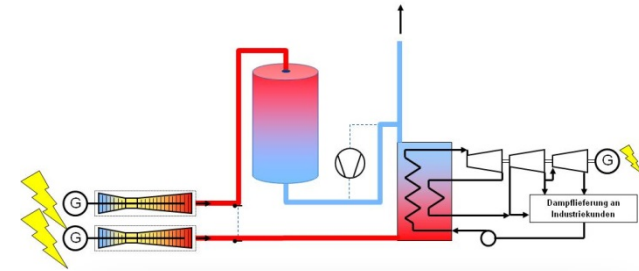
# Thermische Energiespeicher als Querschnittstechnologie

1. **Steigerung der Effizienz** industrieller Prozesse durch die Nutzung von Abwärmeströmen
2. Schaffung zusätzlicher **Flexibilitätsoptionen** für konventionelle Kraftwerke und Verknüpfung von regenerativer Stromerzeugung mit Wärmeanwendungen (Power-to-Heat)
3. Erhöhung des Anteils **erneuerbarer Energien** mittels solarthermischer Technologien



# Betriebsflexibilisierung von GuD-KWK-Kraftwerken

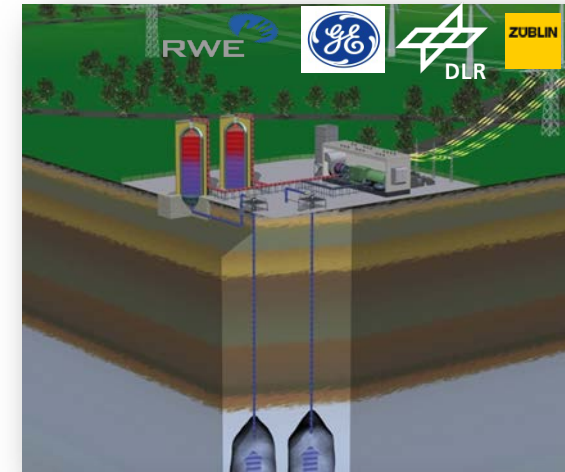
- Aufhebung der Kopplung von Strom- und Wärmeproduktion  
→ bedarfsorientierte KWK-Stromerzeugung
- Schnelle Laständerungen bei der Stromproduktion  
→ Beiträge zum Netzausgleich
- Speicher-Anforderungen:
  - Maximal-Temperatur: ca. 600 °C
  - Wärmeträger: Rauchgas
  - Wärmeleistung ca. 300 MW<sub>th</sub>
  - Kapazität: 8-12 Volllaststunden





# Adiabate Druckluftspeicher- Kraftwerke

- Stromspeicherung im Kraftwerksmaßstab (300 MW)  
→ Netzintegration erneuerbarer Energien
- Hoher Wirkungsgrad durch Integration eines thermischen Energiespeichers  
→ ~70 % Strom-zu-Strom (statt 50 %)
- Speicher-Anforderungen:
  - Maximal-Temperatur: ca. 400-550 °C
  - Wärmeträger: Druckluft bei ca. 65 bar
  - Wärmeleistung ca. 300 MW<sub>th</sub>
  - Kapazität: ca. 1,2 GWh für 4 Turbinen-Stunden
  - Konstante Entladeleistung





# Thermische Energiespeicher als Querschnittstechnologie

1. **Steigerung der Effizienz** industrieller Prozesse durch die Nutzung von Abwärmeströmen
2. Schaffung zusätzlicher **Flexibilitätsoptionen** für konventionelle Kraftwerke und Verknüpfung von regenerativer Stromerzeugung mit Wärmeanwendungen (Power-to-Heat)
3. Erhöhung des Anteils **erneuerbarer Energien** mittels solarthermischer Technologien





# Niedertemperatur-Solarthermie im Gebäudebereich

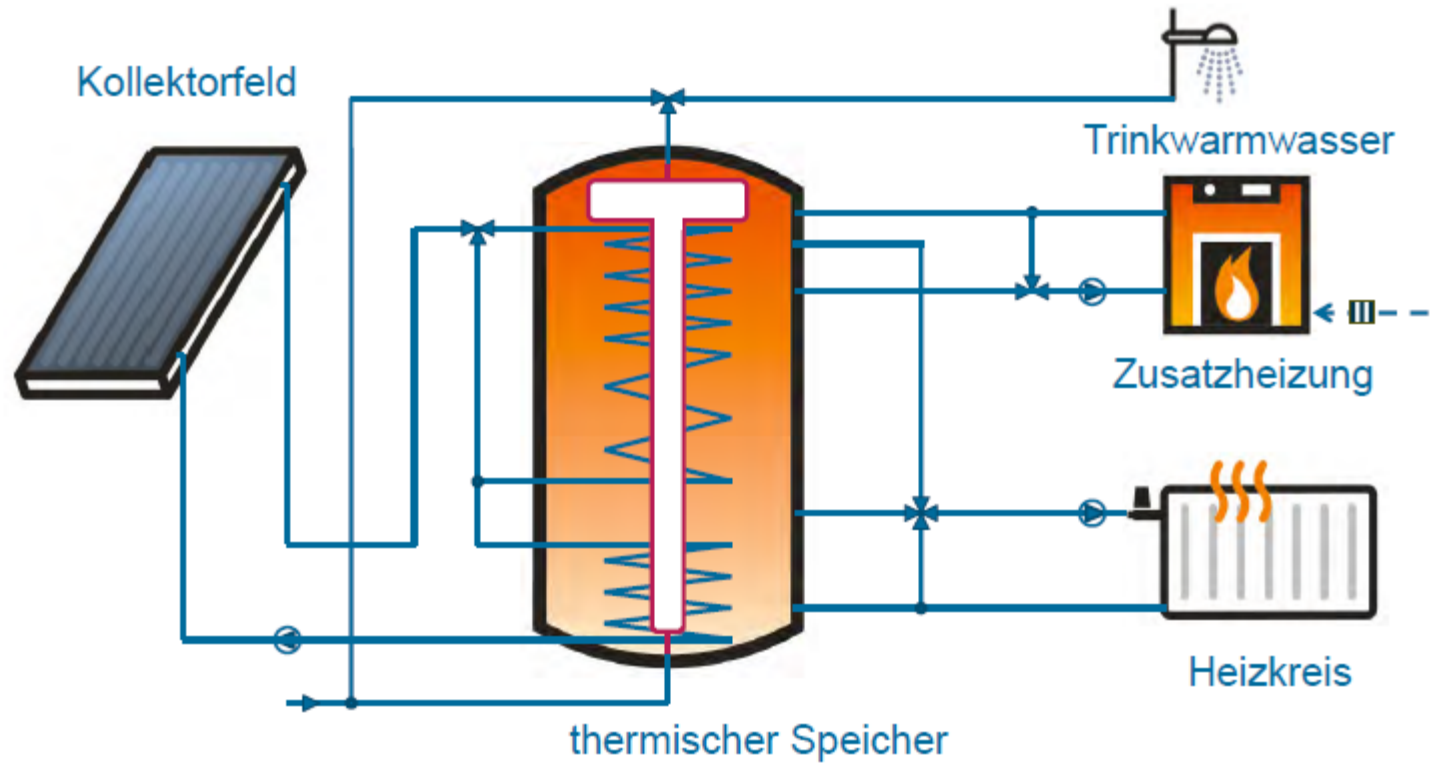
- 50 % des Endenergieverbrauchs zur Wärmebereitstellung fallen für Raumwärme an – davon 2/3 für Wohngebäude
- Solaraktiv-Häuser haben einen solarthermischen Deckungsanteil von mindestens 50 %
- Gute Dämmung
- Große Kollektorfläche
- Einbindung von Wärmespeichern



Quelle: Sonnenhaus-Institut e. V.



# Wärmespeicherung für Niedertemperatur-Solarthermie



Quelle: Fraunhofer ISE



# Realisierung mit Warmwasser-Schichtspeicher

- Für hohen solaren Deckungsanteil sind große Speichervolumina erforderlich (bis über 40 m<sup>3</sup> für ein Einfamilienhaus)
- Schlanke Bauform für gute Schichtung notwendig
- Mehrstufige Be- und Entladung über mehrere integrierte Wärmeübertrager
- Integration in den Wohnbereich macht Wärmeverluste nutzbar
- Speicherung über Tage oder Wochen
- Kaum saisonale Speicherung

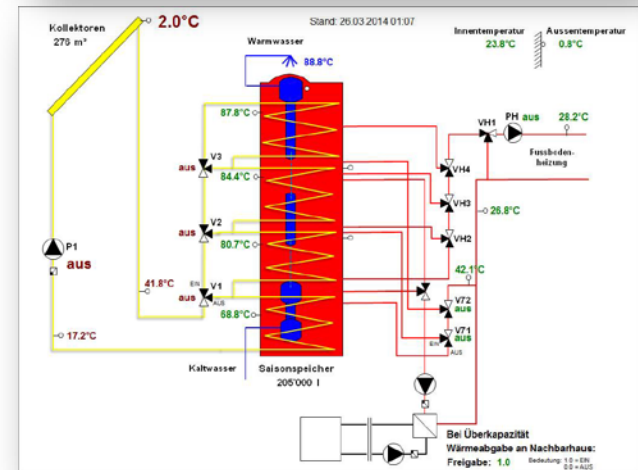


Quelle: Sonnenhaus-Institut e.V.



# 100% solar beheiztes Mehrfamilienhaus

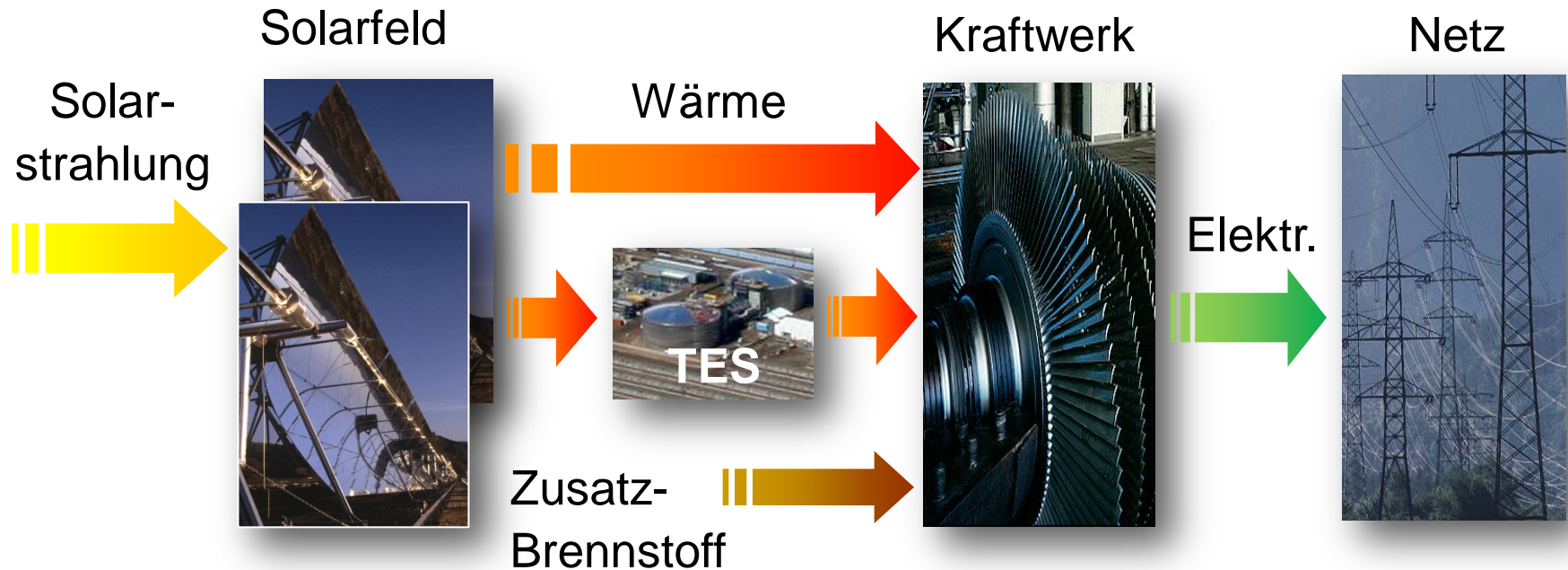
- Fertigstellung 2007 mit 8 Mietwohnungen
- 276 m<sup>2</sup> Kollektorfläche
- 205 m<sup>3</sup> Speichervolumen (17 m Höhe, 4 m Durchmesser) zur saisonalen Nutzung
- Keine Zusatzheizung notwendig
- System hat sich als zweifach überdimensioniert erwiesen
- Optimierungspotenziale durch Messkampagnen identifiziert



Quelle: Jenni Energietechnik, Schweiz



# Konzentrierende Solarthermische Kraftwerke


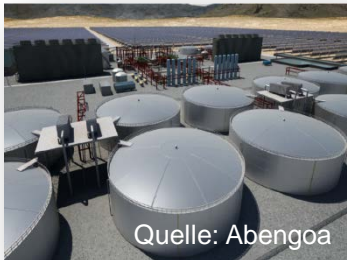



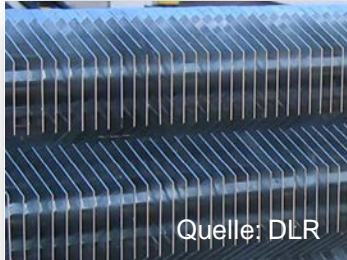


- Erzeugung erneuerbaren Stroms aus konzentrierter Solarstrahlung
- Fossile Zusatzfeuerung
- Integrierte Speicherung für Erhöhung des Kapazitätsfaktors und zur Bereitstellung von regelbarem Strom





# Wärmespeicher für solarthermische Kraftwerke

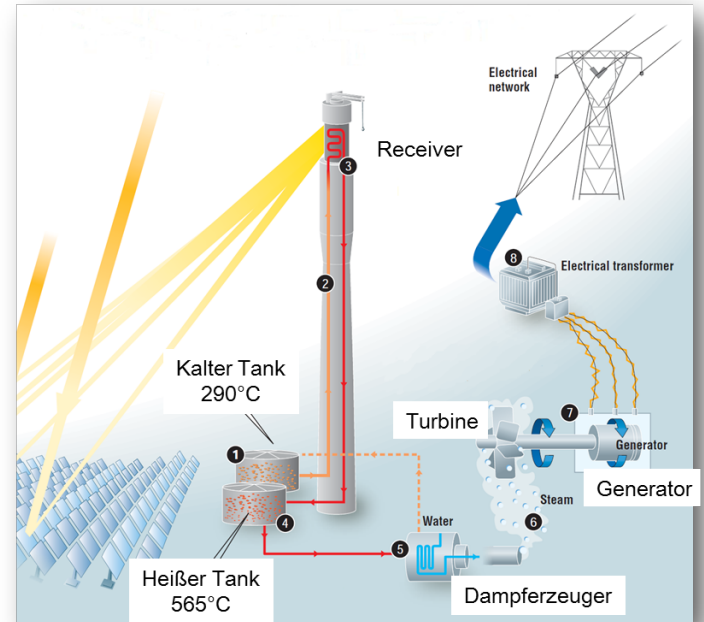
Speicherprinzip	Material	Speichersystem
 <p>Sensible Wärme  <math>Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T</math>                      (flüssig)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flüssigsalz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zwei-Tank-System</li> <li>• Thermocline</li> </ul>  <p>Quelle: Abengoa</p>
 <p>Sensible Wärme  <math>Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T</math>                      (fest)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Natursteine</li> <li>• Keramiken</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schütt-speicher</li> </ul>  <p>Quelle: DLR</p>
 <p>Latentwärme  <math>Q = m \cdot \Delta h_m</math></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nitrat-Salze</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tank mit Wärmeüber-tragerstruktur</li> </ul>  <p>Quelle: DLR</p>



# Flüssigsalzspeicher

## Direkte Systeme (Turmtechnologie)

- Wärmeträgerfluid gleichzeitig Speichermaterial
- Temperaturen bis 560°C
- Große Speicher in den USA (90 MWh) und Spanien (700 MWh) mit Nitratsalz



Quelle: Homepage Torresol Energy



# Latentwärmespeicher

## Demonstration für Direktverdampfung

- Geeignete Phasenwechselmaterialien identifiziert mit Schmelztemperaturen von 140 °C bis 300 °C

Aufbau eines Demonstrationsspeichers und Integration in ein Dampfkraftwerk in Spanien:

- 700 kWh Latentwärmespeicher mit 14 t Natrium-Nitratsalz
- 300 kWh Betonspeicher zur Überhitzung
- 3.000 Betriebsstunden
- 100 Zyklen
- Weiterentwicklung der Wärmeübertragerstrukturen
- Optimierung des Be- und Entladeverhaltens

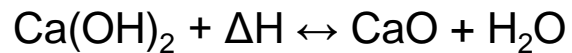




# Thermochemische Speicher als Zukunfts-Option



## Calcium Hydroxid



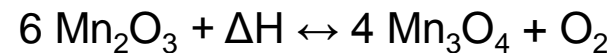
$$T_{\text{eq}} = 507^\circ\text{C at 1 bar}$$

$$\Delta H = 100 \text{ kJ/mol}$$

$$\text{Speicherdichte}^*) = 410 \text{ kWh/m}^3$$



## Metalloxyde



$$T_{\text{eq}} = 980^\circ\text{C at 1 bar}$$

$$\Delta H = 31.8 \text{ kJ/mol}$$

$$\text{Speicherdichte}^*) = 126 \text{ kWh/m}^3$$



<sup>\*)</sup> nur Feststoff, Bulkporosität  $\varepsilon = 0.5$

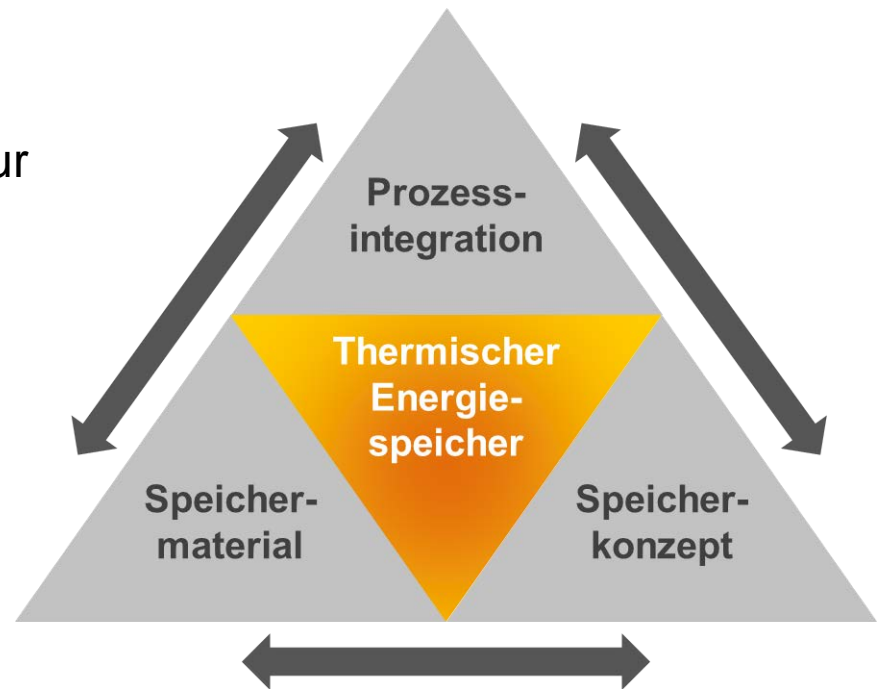


# Fazit – Speicherentwicklung

Interdisziplinäre Zusammenarbeit erforderlich zur Entwicklung von:

- Kostengünstigen **Speichermaterialien** mit hoher Zyklenstabilität und verbesserter Funktionalität
- Innovativen **Speicherkonzepten** zur Erfüllung der Be- und Entladecharakteristik

für eine optimierte thermische und stoffliche **Prozessintegration**





# Gesamtfazit zur thermischen Energiespeicherung

- Thermisch Energiespeicher können als **Querschnittstechnologie** erhebliche Beiträge zur Realisierung der Ziele des Energiekonzepts der Bundesregierung liefern.
- Bisher sind nur sensible Wärmespeicher und latente Wärmespeicher für Nischenanwendungen kommerziell umgesetzt.
- Nutzung der technologischen Vielfalt zur Realisierung spezifischer, optimierter Lösungen zur **Effizienzsteigerung in industriellen Prozessen**
- Einsatz thermischer Energiespeicher als Alternative zur **Flexibilisierung** von Kraftwerksprozessen und zur **Netzstabilisierung**
- Effiziente Lösungen zur **saisonalen Speicherung** erneuerbarer Energien gesucht



# Diskussion

Dr.-Ing. Antje Wörner  
antje.woerner@dlr.de  
+ 49 711 6862 484



Wissen für Morgen

